

УДК 621.311

В. Н. ГАЛУШКО, кандидат технических наук, И. С. ЕВДАСЁВ, кандидат технических наук, И. Л. ГРОМЫКО, магистр технических наук, С. И. КРУК, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрены основные проблемы нейронных сетей на основе своевременной диагностики состояния трансформаторов, связанные с применением искусственных нейронных сетей (ИНС). Предложены основные критерии обнаружения дефектов сердечника или межвитковых коротких замыканий обмоток трансформаторов на основе фазочастотных характеристик. Для проведения частотного анализа был применён метод трёх вольтметров с применением генератора сигналов, на основе которого были получены частотные характеристики для нормального состояния трансформатора, с дефектами сердечника и короткозамкнутыми витками. При обнаружении дефектов в качестве исходных данных использовались импедансная и фазочастотная характеристики.

В настоящее время большая часть трансформаторов системы электроснабжения Республики Беларусь отработали установленный срок службы, однако многие могли бы ещё эксплуатироваться длительное время при условии соблюдения повышенных требований к методам диагностики их технического состояния.

Диагностика трансформаторов в настоящее время является довольно долгим и затратным мероприятием. Ныне существующие методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Диагностические системы для предприятий электроэнергетической отрасли компании *Omicron*, например *Testrano 600*, реализованы в одном устройстве для плановых проверок на месте эксплуатации и при заводских приемочных испытаниях. Оборудование компании *Alstom Schorch Transformatoren* предоставляет сведения о состоянии трансформатора в режиме непрерывного контроля для силовых трехфазных трансформаторов мощностью от 10 до 100 МВА и более. Компания *Siemens* поставляет систему непрерывного контроля состояния *Sitram+* второго поколения на базе вычислительной системы *Sitmatic*, получающей сигналы от датчиков, установленных на трансформаторе, и производящей обработку, анализ и визуализацию данных измерений.

Анализ используемых методов и диагностических систем указывает на определенные сложности при дальнейшем их развитии. Это обусловлено сложностью входных сигналов, достаточно большим числом входных факторов, нелинейными множественными динамическими взаимосвязями с другими параметрами. Данный недостаток в увеличении точности диагностирования и распознавания образов возможно решить за счет применения нейронных сетей.

Несмотря на все безусловные достоинства применяемых как в Республике Беларусь, так и в Республике Узбекистан диагностических систем, они имеют ряд существенных недостатков: не являются универсальными (применяются под конкретные схемы, оборудование и т. д.); используется разнородная и разноточная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностирования оборудования, другими словами, системы не обучаемы. Поэтому применение самообучаемых систем на основе искусственных нейронных сетей позволит устранить перечисленные недостатки. При этом подготовка исходных данных для диагностических систем на основе экспериментальных исследований, например, при возникновении межвитковых замыканий (МКЗ) и других неисправностей представляет определенные практиче-

ские трудности, связанные, например, с большими величинами токов, которые могут повредить испытываемый трансформатор.

Оценка состояния обмотки требует определения параметров, по которым будет производиться анализ, а также выявления корреляции этих параметров с сопротивлением в месте дефекта, количеством короткозамкнутых витков, местоположением дефекта. Метод, позволяющий оценивать работоспособность трансформаторов в эксплуатационном периоде их работы, должен делать возможным выявление ослабления витковой изоляции. При замыкании любых медных проводников сопротивление в месте контакта не будет равно нулю из-за оксидных пленок и, в зависимости от усилия прижима, может находиться в пределах от нескольких десятков долей омов до десятков омов. Кроме этого, витки могут замыкаться через разрушенную, а часто и обугленную, изоляцию или через проводящие мостики, образованные локальными дефектами. В этом случае сопротивление может достигать 1000 Ом и более, т. е. значения, при котором трансформатор будет еще достаточно работоспособен. Однако такие дефекты обмотки в процессе эксплуатации будут активно прогрессировать. Это связано с тем, что, когда сопротивление в месте дефекта станет соизмеримо с модулем комплексного сопротивления витка, наводимая в нем ЭДС будет вызывать дополнительное лавинообразное тепловое разрушение изоляции витка и спекание соседних витков вплоть до выгорания всей катушки. Всё это в итоге способствует скорейшему выходу трансформатора из строя. При этом локальные ослабления изоляции могут возникать как из-за неправильной эксплуатации трансформаторов, так и по различным технологическим причинам (совпадения дефектов эмализоляции провода в катушке, перетирания ее в месте перехлеста проводов, значительное давление в обмотке, приводящее к ее истиранию при динамических режимах работы и др.).

Основная задача методов обнаружения дефектов в обмотках и сердечнике трансформатора состоит в извлечении информативных признаков из данных, которые будут захвачены и переданы датчиком для обработки, например, в нейронную сеть, и выполнения классификации типа дефекта.

Выбор контролируемых параметров и характеристик авторы основывали на анализе существующих нормативных требований при квалификационных, приемосдаточных, периодических и типовых испытаниях и методах контроля, изложенных в ГОСТ Р 58115–2018, ГОСТ 21023–75, ГОСТ 16110–82, ГОСТ 3484.1–88.

В настоящее время перспективным методом диагностики состояния трансформатора является метод частотных характеристик (FRA). Согласно ГОСТ 59239–2020, частотные характеристики могут быть разбиты на три частотных диапазона: в нижнем частотном диапазоне определяющее влияние оказывает магнитопровод, в среднем частотном диапазоне – взаимодействие между обмотками, а в верхнем – конструкция измеряемой обмотки и внутренние соединения; также в области высших частот влияние оказывают измерительные кабели.

В статье [1] представлена методика интерпретации частотных характеристик, основанная на обработке изображений и их анализе с помощью сверточных нейронных сетей. Предложенная процедура переводит частотные характеристики в двумерные изображения с помощью техники визуализации. Точная локализация повреждений выполняется с помощью сверточной нейронной сети, а затем результаты анализируются с помощью метрик оценки производительности нейронной сети. Путем тестирования высокоомных повреждений в различных секциях моделируемой обмотки и пошагового применения предложенного метода, в данном исследовании также осуществляется раннее обнаружение повреждений.

Использование частотной характеристики для диагностики трансформатора было описано в статье [2]. Данный метод заключается в сравнении «фазовых портретов» трансформатора при различных технических состояниях. Однако данный метод не позволяет определить протяженность повреждения и его тип, поэтому нуждается в дальнейшей доработке.

Довольно интересный метод диагностики был представлен в статье [3]. Вместо FRA здесь предлагается использовать фигуры Лиссажу, построенные на вольт-амперной характеристике трансформатора. Преимущество данного метода по сравнению с FRA заключается в возможности в том числе непрерывного онлайн-мониторинга внутренних компонентов трансформатора. Однако предложенный метод чувствителен к изменениям нагрузки и различного рода помехам, а его практическое использование затруднено из-за необходимости создания модели электромагнитных процессов при различных дефектах.

Одним из авторов настоящей статьи был предложен метод диагностики межвитковых коротких замыканий, основанный на анализе с использованием сверточных нейронных сетей отношений токов, напряжений, активных мощностей и коэффициентов мощностей [4]. Данный метод имеет преимущество по сравнению с FRA в виде непрерывного онлайн-мониторинга работы трансформатора, как при контрольных испытаниях с отключением, так и в режиме работы под нагрузкой. С помощью сверточных нейронных сетей данный метод может не только определять наличие и примерное место межвиткового короткого замыкания, но также отличает данный вид неисправности от резких изменений нагрузки и различного рода помех. Однако данный метод не применим для обнаружения дефектов сердечника.

Экспериментально был осуществлен выбор контролируемых параметров для основных неисправно-

стей и возможные методы измерений контролируемых параметров в компонентах трансформаторов, а также определена направленность изменения параметров для промышленной частоты, которые в дальнейшем могут использоваться в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей.

Используя различные измерители иммитанса (например, E7-30 или HM8118), можно непосредственно получить амплитудно-частотные (импедансные) $Z(\omega)$ и фазочастотные $\phi(\omega)$ характеристики трансформаторов. При отсутствии таких приборов на практике можно использовать различные косвенные методы определения комплексных сопротивлений (или проводимостей) для каждой частотной составляющей сигнала с учетом их результирующей погрешности измерений.

Для проведения частотного анализа был использован метод трёх вольтметров. Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров для опытов холостого хода и короткого замыкания приведены на рисунке 1.

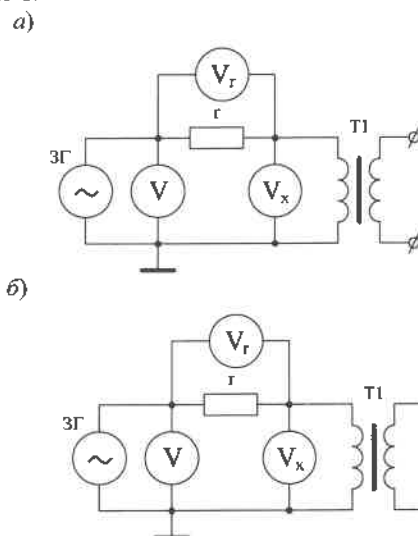


Рисунок 1 – Схемы подключения задающего генератора сигналов и вольтметров:

а – для опыта холостого хода; б – для опыта короткого замыкания

Для построения частотных характеристик используются четыре мультиметра В7-68 (один используется как частотомер, а другие – как вольтметры), задающий генератор сигналов ГЗ-112 и резистор r на 4,5 Ом.

С помощью магазина измерительных сопротивлений выполнялось изменение сопротивления в широких пределах от 0,1 Ом до 100 кОм для имитации различного состояния обмоток (МКЗ, межфазном КЗ) и сердечника. Эксперименты с трансформаторами проводились в лаборатории кафедры «Электротехника» Белорусского государственного университета транспорта.

С целью проведения статистического анализа измеряемых величин импедансных и фазочастотных характеристик выполнялись многократные измерения (для каждой из 100 фиксированных частот в диапазоне от 0 до 1 МГц проводилось по 30 измерений), на основании которых рассчитывались статистические оценки параметров распределения случайных величин: среднее значение и оценка среднего квадратического отклонения. При этом выполнялось определение интервальных оценок математического ожидания и

стандартного отклонения исследуемых результатов измерений с доверительной вероятностью 0,95 и проводилась проверка гипотезы о нормальном законе распределения. Отклонение результатов измерений относительно среднего значения для частот диапазона от 0 до 100 кГц не превысило 1 %.

При разработке универсальной диагностической системы необходимо учитывать не только данный фактор, но и диапазон значений по каждой из фаз. Поэтому если исходное измерение частотных характеристик отдельных фаз исследуемого трансформатора отсутствует, то можно выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (изготовленном по тем же чертежам и тем же заводом-изготовителем). Следует отметить, что из-за возможных отличий в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя (например, модернизации серии), в том числе для однотипных трансформаторов, результаты экспериментов

частотных характеристик могут отличаться. В некоторых случаях при диагностических мероприятиях на предприятиях можно допустить использование неповрежденной фазы для оценки состояния обмотки при условии, что длина магнитной цепи одинакова для рассматриваемых фаз.

На рисунке 2 представлены импедансные и фазочастотные характеристики трехфазного трансформатора ТМ-50/6 при межфазном КЗ в режиме холостого хода для диапазона частот 0–100 кГц. Полученные изображения могут использоваться после нормировки в качестве исходных данных для искусственных нейронных сетей [5]. Особое внимание требуется уделить таким факторам в порядке их значимости, как форма фазовых характеристик, амплитуды резонансов, смещения резонансных частот и число резонансов, связав их с требуемой детализацией при классификации неисправностей.

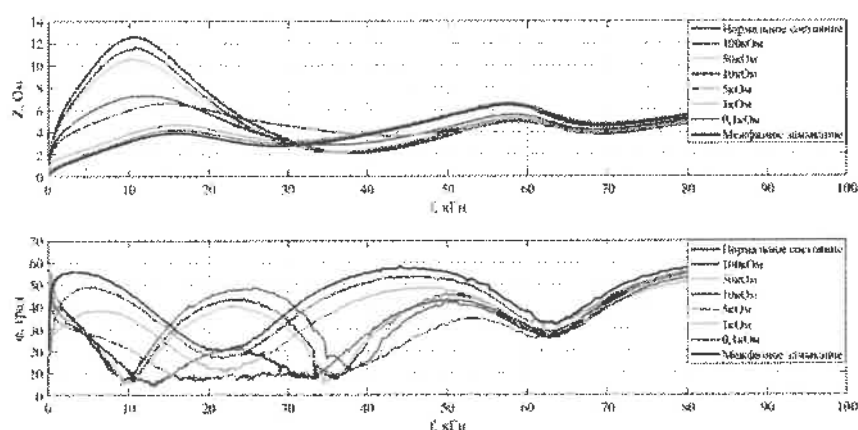


Рисунок 2 – Импедансные и фазочастотные характеристики при межфазном КЗ

Из рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

- наиболее значимые изменения присущи первому «резонансу» до достижения частоты 30–50 кГц;
- амплитуда первого «резонанса» импедансных характеристик снижается по мере уменьшения сопротивления между фазами до наступления полного межфазного КЗ;
- фазочастотные характеристики отличаются значимым изменением формы кривой и сдвигом частоты в большую сторону для первого «резонанса»;
- характер изменения фазочастотных характеристик отличается снижением фазы первого «резонанса»

до 5 кОм, а затем увеличением емкостной составляющей до нескольких омов при межфазном КЗ.

Сравнительный частотный анализ межфазного КЗ и межвиткового КЗ трансформатора ТС-280Р (рисунок 3) указывает на следующие отличия:

- для межвиткового КЗ наблюдается значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;
- форма фазочастотных характеристик значительно отличается;
- для фазочастотной характеристики регистрируется классификационный диапазон на частотах 75–90 кГц (выделено красной пунктирной линией).

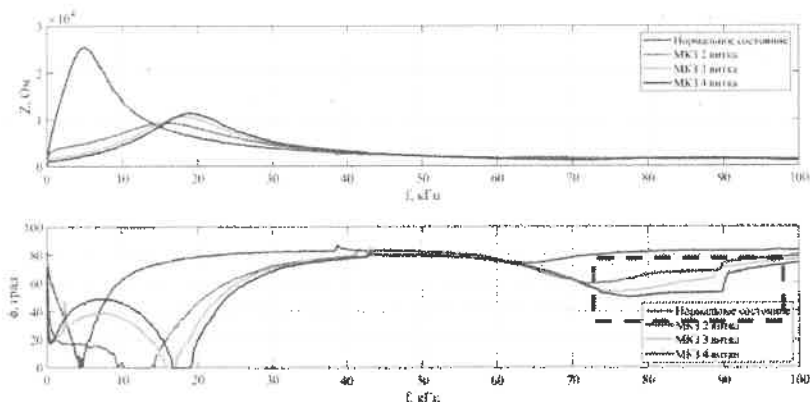


Рисунок 3 – Импедансные и фазочастотные характеристики при МКЗ для диапазона частот 0–100 кГц

Сравнительный частотный анализ межвиткового КЗ и повреждений сердечника трансформатора ОСМ-1,0 УЗ в опыте ХХ (рисунок 4) указывает на следующие отличия:

– для дефектов сердечника наблюдается увеличение амплитуды (в отличие от МКЗ и междуфазного

КЗ, где происходит снижение) и значительный сдвиг первой резонансной частоты импедансной характеристики;

– значительно изменяется форма фазочастотных характеристик.

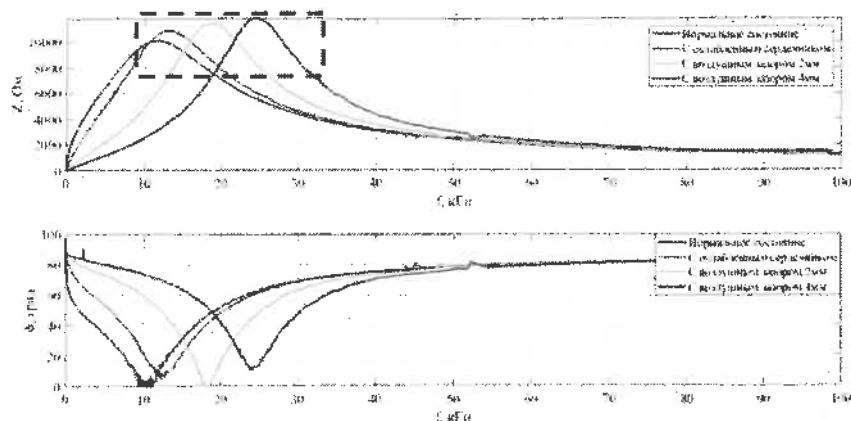


Рисунок 4 – Импедансная и фазочастотная характеристики при обнаружении дефектов сердечника трансформатора ОСМ-1,0 УЗ

На основании приведенных результатов измерений наиболее распространенных повреждений или направленности развития неисправностей изоляции обмоток и состояния сердечника наибольшие изменения в импедансных и фазочастотных характеристиках связаны со следующими параметрами: амплитудой первого «резонанса» импедансных характеристик и сдвигом его частоты; формой фазочастотных характеристик. В связи с этим авторы разработали архитектуру сверточной нейронной сети, позволяющую определять и классифицировать указанные процессы [6].

Приведенные результаты исследования позволяют оценить влияние уровня межвиткового сопротивления, места дефекта и количества витков, задействованных в дефекте, на изменение информативного параметра. Анализ полученных комплексных зависимостей фазочастотных характеристик обмоток исследуемых трехфазных трансформаторов показал возможность оценки их состояния по ФЧХ даже в случае дефекта в виде замыкания одного витка в последней секции обмотки, в том числе через сопротивление более 1 кОм, что характерно для еще неразвившегося дефекта в обмотках.

Сравнительный анализ частотных характеристик однофазных и трехфазных трансформаторов при диагностировании предотказных состояний и отказов авторы используют в качестве основы при создании универсальной диагностической системы определения и классификации неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей однофазных и трехфазных трансформаторов. В результатах работы могут быть заинтересованы энергетические предприятия Республики Беларусь.

Получено 26.02.2025

V. N. Galushko, I. S. Evdasev, I. L. Gromyko, S. I. Kruk. Frequency analysis of three-phase transformers.

The main problems of timely diagnostics of the condition of transformers, including those based on the use of artificial neural networks (ANN), are considered. Basic criteria for detecting core defects or interturn short circuits in transformer windings based on phase-frequency characteristics are proposed. To carry out frequency analysis, the method of three voltmeters was used using a signal generator, on the basis of which frequency characteristics were obtained for the normal state of the transformer, with core defects and short-circuited turns. When detecting defects, impedance and phase characteristics were used as initial data.

Список литературы

- 1 Turn-to-Turn Short Circuit Fault Localization in Transformer Winding via Image Processing and Deep Learning Method / A. Moradzadeh, H. Moayyed, B. Mohammadi-Ivatloo, [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18, № 7. – P. 4417–4426. – DOI: 10.1109/TII.2021.3105932.
- 2 Vosoughi, A. Evaluation of the Image Processing Technique in Interpretation of Polar Plot Characteristics of Transformer Frequency Response / A. Vosoughi, M. Hamed Samimi // International Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP), Ahvaz, Iran, Islamic Republic, 2022. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/MVIP53647.2022.9738771.
- 3 Zhao, X. Experimental Evaluation of Transformer Internal Fault Detection Based on V–I Characteristics / X. Zhao // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – Vol. 67, № 5. – P. 4108–4119. – DOI: 10.1109/TIE.2019.2917368.
- 4 Hramyka, I. Development of Software and Hardware for Identification of Interturn Short Circuit in Single-Phase Transformers / I. Hramyka // Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), Raipur, India, 2024. – P. 241–246. – DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474962.
- 5 Галушко, В. Н. Разработка методологических принципов диагностирования трансформаторов системы нетягового железнодорожного электроснабжения с помощью искусственных нейронных сетей : монография / В. Н. Галушко, И. Л. Громыко, Д. В. Ермоленко. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 167 с.
- 6 Технология применения диагностического комплекса трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, Б. М. Хрусталев, Д. В. Мирош // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2024. – Т. 67, № 2. – С. 125–136. – DOI: 10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136.